DOI:10.11931/guihaia.gxzw201809023

铊和镉胁迫对芦竹生长及光合特征的影响

陈霞霞[1, 2]，蒲高忠[2]，黄玉清[1, 3*]，莫凌[2]

（1. 广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室，广西师范大学 生命科学学院，广西桂林 541006；2. 广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室，广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所，广西桂林 541006；3. 广西师范学院，南宁 530000）

摘要：城市化和工业活动造成了镉（Cd）、铊（Tl）等重金属的广泛污染，给生态系统功能和人类健康带来了一系列问题，因此，如何有效地治理 Cd 和 Tl 污染，是当前最迫切的环境问题之一。芦竹（*Arundo donax*）对多种重金属都有较好的耐受性，是植物修复技术较理想的选择，然而，关于芦竹对 Cd 和 Tl 胁迫生理反应的相关研究较少。因此本研究以芦竹为试验材料，通过添加不同浓度重金属 Tl（4，10 和 20 $mg·kg^{-1}$）、Cd（50，100 和 200 $mg·kg^{-1}$）进行芦竹盆栽试验，测定芦竹的株高、分蘖数、叶绿素含量、光合生理指标以及 Tl 和 Cd 在芦竹中的累积量，探讨芦竹对 Tl 和 Cd 胁迫的响应机制。结果显示：Tl（4~20 mg kg^{-1}）和 Cd（50~200 mg kg^{-1}）对芦竹株高、分蘖数以及叶绿素含量均无显著影响（$P > 0.05$）；芦竹体内 Tl 和 Cd 含量随着 Tl 和 Cd 浓度的升高呈上升趋势，芦竹体内 Tl 含量的分布规律为根>茎>叶，Cd 含量的分布规律：Cd 浓度 50 mg kg^{-1} 时为茎>叶>根，Cd 浓度 100 和 200 mg kg^{-1} 时为根>茎>叶，表明 Tl 和 Cd 主要分布在根部，芦竹对 Tl、Cd 有一定的富集能力。Cd 和 Tl 处理均显著降低芦竹叶片的胞间 CO_2 浓度，在 Tl 浓度为 10 mg kg^{-1} 时，净光合速率、气孔导度和蒸腾速率得到显著提高，当 Cd 浓度为 50 mg kg^{-1} 时，净光合速率、气孔导度和蒸腾速率得到显著提高。研究表明，芦竹对重金属 Cd 和 Tl 有较强的耐受性，可为 Cd 和 Tl 污染土壤的治理和修复提供参考。

关键词：植物修复，铊，镉，芦竹，光合特征

中图分类号：Q945　　　　**文献标识码：**A

Effects of thallium and cadmium stress on growth and photosynthetic characteristics of *Arundo donax*

CHEN Xiaxia[1,2], PU Gaozhong[2], HUANG Yuqing[1, 3*], MO Ling[2]

(1. *Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education Guangxi Normal University, College of Life Science, Guangxi Normal University*, Guilin 541006, Guangxi, China; 2. *Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain*, Guilin 541006, Guangxi, China; 3. *Guangxi Teachers Education University*, Nanning 530000, China)

Abstract: Urbanization and industrial activities have contributed to widespread contamination by

---

基金项目：广西科技攻关计划项目(桂科重 1598014-3)；广西自然科学基金项目（2015GXNSFEA139001, 2015GXNSFAA139072）；广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室基金（16-A-03-02）[Supported by Guangxi Science and Technology Project (1598014-3); Guangxi Natural Science Foundation Program (2015GXNSFEA139001, 2015GXNSFAA139072); Guangxi Karst Key Laboratory Fund for Plant Conservation and Restoration Ecology (16-A-03-02)]。

作者简介：陈霞霞(1994–)，女，山西阳泉人，硕士研究生，主要从事植物生态学研究，（E-mail）chenxx7276@163.com。

***通信作者：**黄玉清，博士，研究员，研究方向为植物适应环境变化机理与生态系统水分循环，（E-mail）hyqcoco@gxib.cn。

heavy-metals, such as cadmium (Cd) and thallium (Tl), which have caused a series of problems to ecosystem functioning and human health. Therefore, how to effectively control the Cd and Tl pollution is one of the most urgent environmental problems. *Arundo donax* has a strong tolerance of a variety of heavy metals, and is an ideal choice for phytoremediation, however, there is limited information on the physiological responses of *Arundo donax* to Cd and Tl stress, regarding its highly desirable for phytoremediation of metal contaminated sites. Therefore, a potted experiment was carried out to investigate the effect of different concentrations Cd (50, 100 and 200 mg kg^{-1}) and Tl (4, 10 and 20 mg kg^{-1}) stress on height, number of nodes and chlorophyll content of *Arundo donax*, photosynthetic characteristics and the accumulation of Cd and Tl in *Arundo donax* after four months of cultivation, all these parameters were determined for each treatment. The results showed that the height, number of nodes and chlorophyll content of *Arundo donax* were not significantly affected by exposure to Tl (form 4 to 20 mg kg^{-1}) or Cd (form 50 to 200 mg kg^{-1}) (P > 0.05). The concentrations of Tl and Cd in *Arundo donax* increased with the additive concentration of Tl and Cd, Tl accumulated in the order of root > stem > leaf; while Cd accumulated in order of stem > leaf > root under 50 mg kg^{-1} Cd concentration treatments and in order of root > stem > leaf under 100 and 200 mg kg^{-1} Cd concentration treatments, Tl and Cd are mainly distributed in the root, *Arundo donax* has certain enrichment ability to Tl and Cd. Although all Tl treatments significantly decreased intercellular CO_2 concentration(C_i) of *Arundo donax*, 10 mg kg^{-1} Tl treatment significantly increased the net photosynthetic rate(P_n), stomatal conductance(G_s) and transpiration rate(T_r). Meanwhile, all Cd treatments significantly decreased the intercellular CO_2 concentration and the water use efficiency(*WUE*), but 50 mg kg^{-1} treatment significantly increased the net photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate. These results suggest a strong tolerance of *Arundo donax* to increased Cd or Tl pollution and it can be used as a reference for the treatment and remediation of Cd or Tl contaminated soil.

Key words: phytoremediation, Thallium, Cadmium, *Arundo donax*, photosynthetic characteristics

重金属污染土壤的治理是全世界各国面临的重大难题。土壤中的重金属，会使土壤肥力退化，降低作物产量，并恶化水环境。Tl 是一种稀有且非必需的金属，具巨毒性，Tl 污染源主要来自矿山资源的开发利用（刘敬勇等，2007）。Cd 是一种银白色的有毒金属，主要应用于工业，由于其在工业中的广泛应用及其本身的难以降解和较强的隐蔽性，成为最具威胁的重金属元素之一（孙婕妤等，2018）。土壤中的 Tl 和 Cd 在土壤-植物系统之间具有高度流动性，具有被植物体优先吸收富集的特性，易于通过土壤富集到农作物，不仅会对植物的生长和发育产生影响，而且能通过食物链被人体摄入而危害身体健康，如 Tl 中毒和“骨痛病”的出现（李汉帆等，2007；顾继光和周启星，2002）。经调查发现在我国广西阳朔受污染的农田中同时存在 Tl 和 Cd 这两种重金属，所以本实验选择这两种重金属进行浓度梯度处理。另外，我们已在广西阳朔受污染的农田中开展了复合污染的实地修复研究，因此本研究只涉及它们的单独效应。

植物修复技术由于具有成本低、易于后处理等优点而成为解决土壤重金属污染的研究热点（杨列和郭后庆，2018）。光合作用是绿色植物特有的功能，也是植物的基础代谢过程，为植物提供所需的有机物、能量和氧气，是植物的基本生命活力，植物生产力和作物产量都受到光合作用效率的影响（许大全，2002），而光合作用对环境因子敏感度较高，容易受重金属胁迫（张嘉桐和孟丙南，2018；胡小英等，2018），因此研究重金属胁迫对植物光合作用的影响可以为植物修复重金属污染的土壤提供科学依据。

芦竹(*Arundo donax*)，属禾本科芦竹属多年生植物，分布于江苏、浙江、湖南、山东、

广西等地区，主要用作优质的造纸原料，既耐寒耐热，又耐涝耐旱，在贫瘠土壤中或受污染的湿地中也具有较强的生命力，是矿渣堆、尾矿坝等严重污染区良好的恢复植物（唐文杰和李明顺，2008）。芦竹修复环境后的利用是非食用性，后期可进行资源化利用（如造纸，发电等），可避免重金属在食物链及食物网中的传递（王凤永，2011）。种植芦竹既可以固土护堤，又可以美化和保护湿地生态环境，因此具有重要的经济价值。在重金属污染胁迫下，芦竹有较好的耐受性，具有生物量大、根系发达、适应性强等特点，因而是植物修复技术较理想的选择之一（韩志萍和胡正海，2005；韩志萍等，2005；韩志萍和王趁义，2007）。

芦竹目前的研究多集中在重金属耐受性及对重金属的富集能力（韩志萍，2005，2006；韩志萍和胡正海，2005；韩志萍和王趁义，2007；韩志萍等，2005，2008，2010；Alshaal et al., 2015；苗旭锋，2010），也有关于芦竹生理、生态特性的研究（朱志国和周守标，2014；赵建松等，2008），对于其在重金属胁迫下光合作用的研究相对较少（Pu et al., 2018）。有研究表明（韩志萍和王趁义，2007；马继彪，2014；朱志国和周守标，2014；郭朝晖等，2011），芦竹对多种重金属都有较好的耐受性，是植物修复技术较理想的选择，然而，缺乏对芦竹在 Cd 和 Tl 胁迫下光合特性的研究。本实验以广西阳朔县思的村矿区及其下游污染田地污染状况为调查点，前期调查表明，该污染土壤的镉和铊含量超标，分别为 5.73-300.3 和 0.5-12.30 mg kg^{-1}。基于此，我们采用盆栽试验的方法，设置不同浓度土壤外源重金属 Tl 和 Cd，研究其对芦竹生长、叶绿素含量以及光合特性的影响，探讨 Tl 和 Cd 对芦竹的毒害机理，以期为 Tl 和 Cd 污染土壤的修复与治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

以芦竹为实验对象，供试土壤为红壤，采自广西植物研究所的花园表层土壤（0~20 cm），供试土壤基本理化性质见表 1，土壤 Cd 和 Tl 含量分别为 0.014 和 0.003 mg kg^{-1}。试验用盆为塑料盆（26 cm×75 cm×38.5 cm），在每个塑料盆中装入试验土 5 kg。试验开始时，土壤中分别加入由 TlCl 和 $CdCl_2$ 配成的溶液，并与土壤混合均匀，根据土壤环境质量标准及植物超富集含量标准，每个重金属设置 3 个浓度，每个浓度 3 个重复，即铊浓度为 4，10 和 20 mg kg^{-1}（依次记为 Tl1，Tl2，Tl3），镉浓度为 50，100 和 200 mg kg^{-1}（依次记为 Cd1，Cd2，Cd3），同时设置对照组（不添加铊和镉，记为 CK），每个处理设置 3 个重复。实验用芦竹为幼嫩茎段作为外置体，经组织培养的芦竹幼苗，选择其中株高（15 cm）相同的幼苗为实验对象移栽至不同处理的土壤中。在试验过程中，保持芦竹土壤含水量 90%。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of tested soils

理化性质 Physico-chemical properties	有机质 Organic matter (g kg^{-1})	总氮 TN (g kg^{-1})	总磷 TP (g kg^{-1})	全钾 TK (mg kg^{-1})
含量 Content	10.24	1.21	0.74	170.25

1.2 生长指标及叶绿素 SPAD 值的测定

芦竹株高可用卷尺测定；相对叶绿素含量（SPAD 值）（李泽等，2017）采用 SPAD-502 叶绿素测定仪（日本 Konica 公司）在上午 9: 00 测定，测定时选择位置相同朝向一致的成熟叶片并避开叶片的主脉，每处理测 3 片叶，每片叶测三个点取平均值。

1.3 光合生理指标的测定

采用 LI-6400xt 便携式光合仪（LI-COR，USA）对芦竹叶片进行测定，测量时选取叶位及长势基本一致且无病虫害的叶片，并保持叶片自然生长角度，每处理测定 3 株。测量指标包括净光合速率（P_n，μmol m^{-2} s^{-1}）、气孔导度（G_s，mol m^{-2} s^{-1}）、胞间 CO_2 浓度（C_i，μmol·mol^{-1}）、

蒸腾速率（T_r，mmol m^{-2} s^{-1}）和光合有效辐射（*PAR*，μmol m^{-2} s^{-1}），并计算叶片水分利用率：$WUE= P_n \cdot T_r^{-1}$（Nijs et al., 1997）。

1.4 Tl 和 Cd 含量的测定

Tl 和 Cd 胁迫处理 4 个月后，收获各个处理的叶片、茎段和根系。先用自来水冲洗干净，再用去离子水冲洗 3 遍，105℃杀青 30min 后，于 80℃恒温烘至恒重，用不锈钢植物粉碎机粉碎制样，样品过 20 目尼龙筛。土壤样品经自然风干、磨细、过筛后备用。植物样品和土壤样品均采用微波消解仪消解，利用安捷伦 7700e 电感耦合等离子体质谱仪（7700series ICP—MS 美国）测定待测液中 Tl 和 Cd 含量。

1.5 数据处理

运用 Excel 对数据进行整理与计算，实验结果均为平均值±标准差，运用 SPSS 23 进行单因素方差分析（One-way ANOVA）和最小显著差异法（LSD）进行差异显著性检验，显著性水平设定为 $P = 0.05$，运用 Sigmaplot 12.5 进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 Tl 和 Cd 处理对芦竹生长的影响

不同浓度 Tl 和 Cd 处理对芦竹生长的影响见表 2。芦竹株高 Cd1 处理最小，Tl2 处理最大；分蘖数 Cd2 处理最多，Cd3 处理最少；叶绿素含量 Tl1 处理最高，Tl2 处理最低。随着 Cd 浓度的增大，芦竹株高和叶绿素含量表现为 Cd3>Cd2>Tl1，分蘖数表现为 Cd2>Cd1>Tl3。随着 Tl 浓度的增大，芦竹株高表现为 Tl2>Tl3>Tl1，叶绿素含量表现为 Tl1>Tl3>Tl2，分蘖数表现为 Tl3>Tl2=Tl1。与 CK 处理相比，不同浓度 Cd 和 Tl 处理对芦竹高度和叶绿素含量的影响均不显著（$P > 0.05$），Cd2 处理显著提高了芦竹的分蘖数（$P < 0.05$），其他处理差异均不显著（$P > 0.05$）。在本实验重金属浓度处理范围内，不同浓度 Cd 和 Tl 处理对芦竹相关生理指标的影响不显著，说明芦竹对 Tl 和 Cd 胁迫具有较强的耐受性。

表 2 不同浓度 Tl 和 Cd 处理对芦竹生长的影响

Table 2 Effects of different concentrations of thallium and cadmium on the growth of *Arundo donax*

处理 Treatment	分蘖数 Number of nodes	高度 Height(cm)	SPAD
CK	4.00±1.00a	86.72±11.96a	43.11±2.41a
Cd1	6.00±1.73ab	72.86±15.18a	43.80±1.54a
Cd2	7.67±2.89b	73.85±10.65a	43.56±3.67a
Cd3	3.67±1.53a	89.00±10.15a	42.89±3.02a
Tl1	4.67±1.15ab	83.33±5.77a	46.11±1.17a
Tl2	4.67±1.15ab	90.00±8.66a	40.89±8.28a
Tl3	5.33±1.15ab	83.33±15.28a	45.00±5.67a

注：不同字母代表不同处理之间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

Note: Data with differences letters indicate a significant different at $P < 0.05$. The same below.

2.2 Tl 和 Cd 在芦竹中的积累特征

Tl 和 Cd 在芦竹中的含量变化见表 3。随着 Tl 和 Cd 浓度的增加，植株对 Tl 和 Cd 的累积量也相应增加（差异显著，$P < 0.05$）。从芦竹体内重金属的含量来看，Tl 在芦竹植株内的分布规律为根>茎>叶，表明芦竹对 Tl 的富集主要集中在根系，根系对 Tl 有一定的截留作用，从而减轻了 Tl 对地上部分的毒害作用。CK 处理和 Cd1 处理，Cd 在芦竹体内的分布为茎>叶>根，表明芦竹对 Cd 有一定的向地上部分转运的能力；Cd2 和 Cd3 处理则表现为根>茎>叶，表明芦竹对 Cd 的富集主要集中在根系。

表 3 培养 4 个月后 Tl 和 Cd 在芦竹中的含量变化

Table 3 Contents changes of thallium and cadmium in *Arundo donax* after 4 months of cultivation

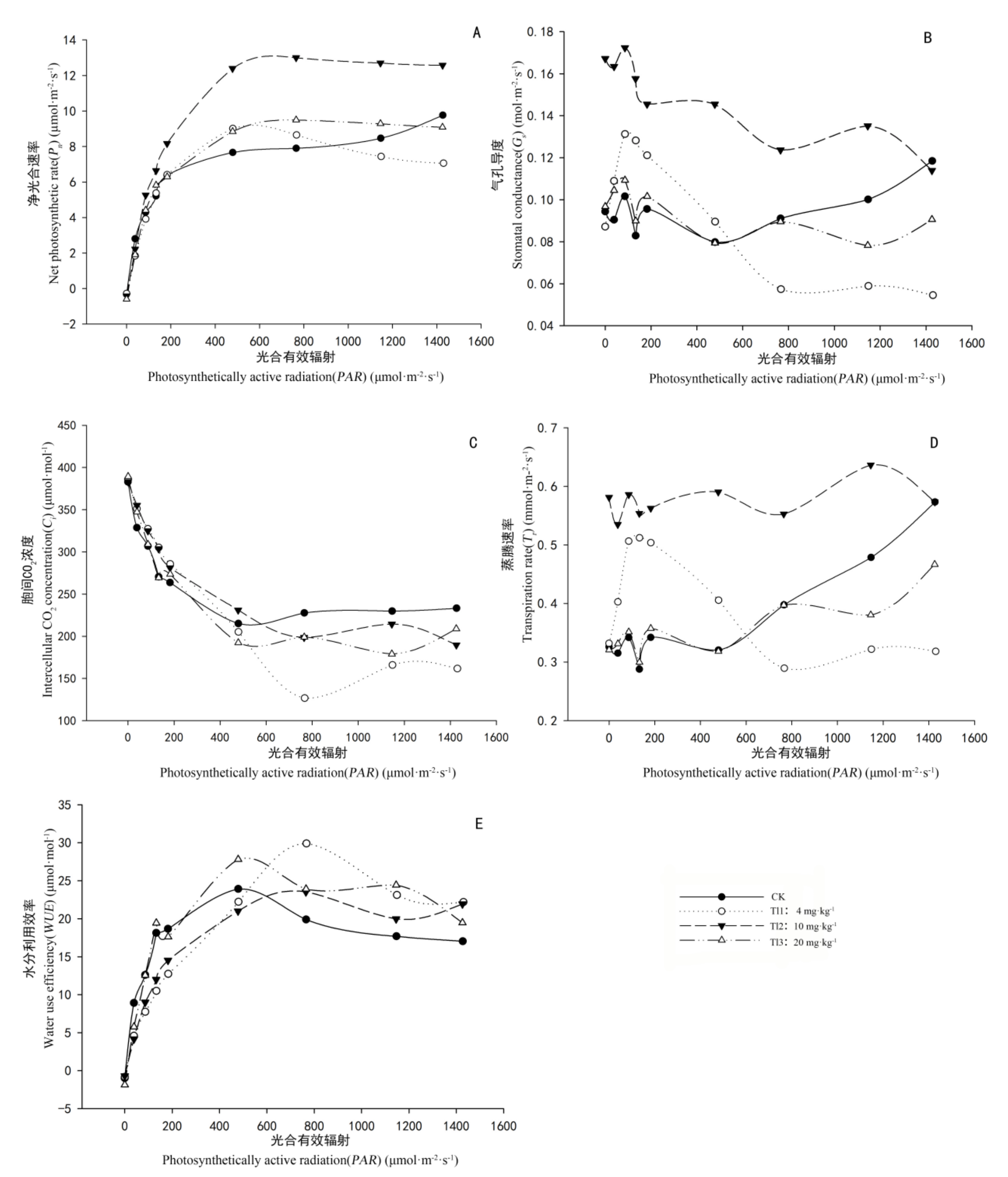
处理 Treatment	Cd 含量 Cadmium content(mg·kg^{-1})			处理 Treatment	Tl 含量 Thallium content(mg·kg^{-1})		
	根 Roots	茎 Stems	叶 Leaves		根 Roots	茎 Stems	叶 Leaves
CK	0.62a	1.35a	1.52a	CK	0.94a	0.11a	0.08a
Cd1	1.04a	7.43d	3.51b	Tl1	0.95a	0.28b	0.14b
Cd2	59.20b	6.21b	6.15d	Tl2	1.32b	0.24b	0.15c
Cd3	46.54b	7.06c	5.94c	Tl3	1.60c	0.55c	0.27d

2.3 不同浓度 Tl 处理对芦竹光合作用的影响

净光合速率（P_n）是评价植物能否适应环境的一个重要指标，净光合速率越高，表明植物进行光合作用的能力越强，反之，则越弱（胡小英等，2018）。由图 1 可知，随着光合有效辐射的增大，芦竹叶片净光合速率也随之增加，但不同浓度 Tl 处理则呈现先增大后下降的趋势，且随着光合有效辐射的增大，对照处理光合速率逐渐高于 Tl1 和 Tl2 处理；而胞间 CO_2 浓度则随着光合有效辐射的增大而减小，且对照处理高于不同浓度 Tl 处理；气孔导度在 550 μmol·m^{-2} s^{-1} 之前表现为 Tl2>Tl1>Tl3>CK，550 μmol·m^{-2} s^{-1} ～1 400 μmol·m^{-2} s^{-1} 则表现为 Tl2>CK>Tl3>Tl1（图 1：B）。当光合有效辐射为 1200 μmol·m^{-2} s^{-1} 时，净光合速率为 Tl2> Tl3>CK>Tl1（图 1：A），胞间 CO_2 浓度表现为 CK>Tl3>Tl2>Tl1（图 1：C），蒸腾速率与气孔导度的变化基本一致表现为 Tl2>CK>Tl3>Tl1（图 1：D），所有 Tl 处理水分利用效率均高于对照处理，表现为 Tl3>Tl1>Tl2>CK（图 1：E），说明 Tl 胁迫降低芦竹叶片对水分的消耗量，水分利用效率随着 Tl 浓度的升高呈先下降后上升的趋势。Tl 处理均显著降低芦竹胞间 CO_2 浓度，但 Tl2 处理显著提高净光合速率、气孔导度和蒸腾速率，说明 Tl 胁迫对芦竹叶片光合作用会产生影响，即随着 Tl 浓度的升高，对光合作用的抑制先增强后减弱，表明芦竹对 Tl 有较强的耐受性。

2.4 不同浓度 Cd 处理对芦竹光合作用的影响

不同浓度 Cd 处理对芦竹光合作用的影响见图 2，随着光合有效辐射的增大，对照处理芦竹叶片的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率也随之增大，不同浓度 Cd 处理则呈现先增大后下降的趋势，且 Cd1 和 Cd2 处理净光合速率高于对照处理，Cd3 处理芦竹净光合速率和气孔导度低于对照处理。光合有效辐射为 1 200 μmol·m^{-2} s^{-1} 时，净光合速率表现为 Cd1>Cd2>CK>Cd3（图 2：A），气孔导度和胞间 CO_2 浓度表现为 CK>Cd1>Cd2>Cd3（图 2：B，C），蒸腾速率则表现为 Cd1>Cd2>Cd3>CK（图 2：D），水分利用效率表现为 CK>Cd3>Cd1>Cd2（图 2：E），说明 Cd 胁迫会增加芦竹叶片对水分的消耗量，水分利用效率随着 Cd 浓度的升高呈先下降后上升的趋势。镉处理芦竹叶片的胞间 CO_2 浓度和水分利用效率均显著降低，但 Cd1 处理净光合速率、气孔导度和蒸腾速率显著提高，说明 Cd 胁迫对芦竹叶片的光合作用产生影响，即 Cd 浓度越高，对光合作用的抑制作用越强，表明芦竹对 Cd 有一定的耐受性。



注：**A**. 净光合速率；**B**. 气孔导度；**C**. 胞间 CO_2 浓度；**D**. 蒸腾速率；**E**. 水分利用效率。下同。

Note：**A**. Net photosynthetic rate(P_n); **B**. Stomatal conductance(G_s); **C**. Intercellular CO_2 concentration(C_i); **D**. Transpiration rate(T_r); **E**. Water use efficiency(*WUE*). The same below.

图 1 不同浓度 Tl 处理对芦竹光合作用的影响

Fig. 1 Effects of photosynthetic characteristics of *Arundo donax* under different concentrations of Thallium stress

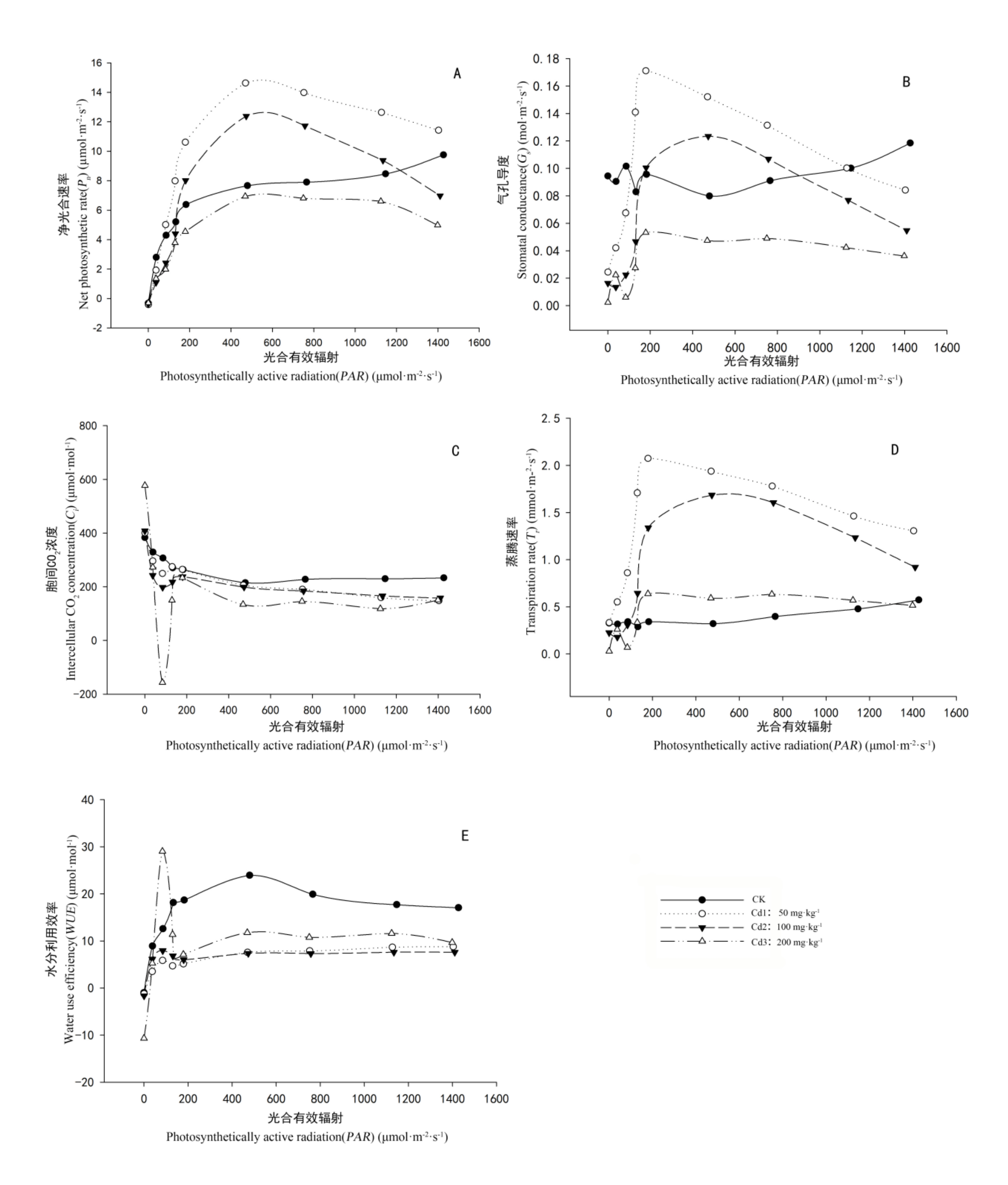


图 2 不同浓度 Cd 处理对芦竹光合作用的影响

Fig. 2 Effects of photosynthetic characteristics of *Arundo donax* under different concentrations of cadmium stress

3 讨论与结论

Tl 和 Cd 均不是植物生长所必需的元素，它们的存在会对植物的生理和生长造成不可逆的影响（李汉帆等，2007；孙婕妤等，2018）。由于 Tl 和钾（K）具有相似的吸收途径，如果 Tl 取代了植物体内的 K，便会对植物的营养传输产生抑制，使植物的生长受到影响（刘敬勇等，2007）。本研究结果表明 Tl 与 Cd 处理均会对芦竹的生长产生影响，但与对照处理相比差异不显著，这与 Pu et al.（2018）和韩志萍等（2005）的研究结果一致。芦竹对 Tl 和 Cd 有一定向地上部分转运的能力，且其对 Tl 和 Cd 的富集主要集中在根部，这是由于植

物对重金属的耐性机制，即植物根部可以限制重金属由根部向地上部转移，使得地上部保持较低的重金属含量，从而降低重金属对植物的毒害作用。

重金属胁迫降低植物叶片净光合速率已被许多研究证实（Kalaji & Lobody，2007；姚广等，2009；鲁艳等，2011）。以往的研究结果表明能使植物叶片光合能力降低的植物自身因素主要有两类，即气孔因素和非气孔因素。气孔因素即由气孔部分关闭导致气孔限制，非气孔因素即由叶肉细胞光合活性下降导致非气孔限制（付士磊等，2006）。Farquhar&Sharkey（1982）认为，胞间 CO_2 浓度的大小是评判气孔限制和非气孔限制的依据，如果净光合速率的降低伴随着细胞间 CO_2 浓度和气孔导度的下降，净光合速率下降的主要原因是气孔因素，反之，则是非气孔因素。本实验结果表明，Tl 与 Cd 处理芦竹的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度随着胁迫浓度的增加分别呈现先上升后下降、下降趋势，而胞间 CO_2 浓度则随着胁迫浓度的增加呈上升趋势。表明在 Tl 与 Cd 胁迫条件下，芦竹叶片光合速率的变化主要是由非气孔因素限制所致，即光合速率下降的主要原因是由叶肉细胞光合活性的降低导致，这与李明亮等（2016）、孙光闻等（2005）、谷绪环等（2008）的研究结果一致。芦竹在低浓度重金属胁迫条件下，可能需要消耗更多的能量，以维持体内的正常代谢，但随着重金属浓度的增大，早期的刺激作用逐渐被抑制作用所代替，从而导致光合速率降低。

重金属可以通过影响叶绿素含量对光合作用产生影响，进而影响植物的代谢过程，最终影响植物的生长。适当的 Tl 胁迫通过增加其叶绿素含量来促进芦竹的光合作用，而高浓度 Tl 会使芦竹叶片的光化学活性下降，从而抑制其光合作用（Pu et al., 2018）。低浓度 Cd 胁迫使叶绿素含量增加，是由于 Cd 的络合物会加速植物体从土壤中吸收 Mg，Fe，K，P 等离子，促进叶片卟啉环的形成，从而促使叶绿素含量的增加；而高浓度 Cd 处理会使叶绿素含量减少，是由于 Cd 是一种有效的光合抑制剂，会破坏叶绿体结构和生理活性，抑制光合色素的形成，从而导致叶绿素含量降低，影响光合作用的进行（秦天才等，2000）。

水分利用效率可以展示植物产量与其耗水量之间的关系，水分利用效率越低，表明植物产生单位光合物质而对水分的消耗量就越大（罗艾滢，2014）。Tl 或 Cd 胁迫条件下，芦竹叶片的水分利用效率均随着重金属浓度的增大呈现先下降后上升的趋势，但 Tl 胁迫的水分利用效率高于对照处理，表明 Tl 胁迫降低了芦竹叶片的水分利用效率，可能是由于 Tl 胁迫对植物的营养传输产生抑制；而 Cd 胁迫的水分利用效率低于对照处理，Cd 胁迫增加了芦竹叶片的水分利用效率，可能是由于 Cd 胁迫导致植物需要消耗更多的能量以维持体内的正常代谢。总之，Tl 和 Cd 胁迫均会对芦竹的光合作用及水分的吸收产生影响，但对芦竹的生长指标的影响不大，表明芦竹对 Tl 和 Cd 胁迫具有较强的耐受性。

综上所述，研究结果显示芦竹对 Tl 和 Cd 具有较强的耐受性，其一，归因于其根部限制 Tl 和 Cd 由根部向地上部转移；其二，虽然 Tl 和 Cd 胁迫对芦竹的光合特性及水分利用效率产生了影响，但是它们对芦竹生长指标的影响不大，提示芦竹可能存在对 Tl 和 Cd 较强的解毒系统。因此，开展 Tl 和 Cd 胁迫下芦竹抗氧化酶系统的变化特征的研究，能更深入了解芦竹对 Tl 和 Cd 的耐性机制。此外，由于目前土壤重金属污染多为多种重金属复合污染，开展芦竹对 Tl 和 Cd 复合污染的研究可能更有利于了解芦竹在土壤污染修复中的作用机制。

参考文献：

ALSHAAL T, ELHAWAT N, ÉVA DOMOKOS-SZABOLCSY, et al., 2015. Giant Reed (*Arundo donax* L.): A green technology for clean environment[M]// Phytoremediat. Springer International Publishing, 1: 3-20.

Farquhar GD, Sharkey TD, 1982. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Ann Rev Plant

Physiol, 33 (33): 317-345.

FU SL, ZHOU YB, HE XY, et al., 2006. Effects of drought stress on photosynthesis physiology of *Populus pseudo-simonii*[J]. J Appl Ecol, 17(11): 2016-2019. [付士磊，周永斌，何兴元，等，2006. 干旱胁迫对杨树光合生理指标的影响[J]. 应用生态学报，17(11)：2016-2019.]

GU JG, ZHOU QX, 2002. Cleaning up through phytoremediation: A review of Cd contaminated soils[J]. Ecol Sci, 21(4): 352-356. [顾继光，周启星，2002. 镉污染土壤的治理及植物修复[J]. 生态科学，21(4)：352-356.]

GU XH, JIN CW, WANG YZ, at el., 2008. Effects of heavy metal Pb and Cd on chlorophy ll contents and photosynthetic characteristics in different apple seedlings[J]. Anhui Agric Sci, 36(24): 10328-10331. [谷绪环，金春文，王永章，等，2008. 重金属 Pb 与 Cd 对苹果幼苗叶绿素含量和光合特性的影响[J]. 安徽农业科学，36(24)：10328-10331.]

GUO CH, WANG FY, SONG J, et al., 2011. Leaching and transferring characteristics of arsenic, cadmium, lead and zinc in contaminated soil-giant reed-water system[J]. J Cent S Univ(Nat Sci Ed), 42(8): 2184-2192. [郭朝晖，王凤永，宋杰，等，2011. 污染土壤-芦竹-水体系中 As，Cd，Pb 和 Zn 的渗漏与迁移特征[J]. 中南大学学报(自然科学版)，42(8)：2184-2192.]

HAN ZP, 2005. A research on restoring wetland polluted by some heavy metals using giantreed[J]. Chin J Environ Eng, 6(8): 30-33. [韩志萍，2005. 利用芦竹修复重金属污染湿地的研究[J]. 环境工程学报，6(8)：30-33.]

HAN ZP, 2006. Accumulation and distribution of chromium, copper and nickel in *Arundo donax* L.[J]. Environ Sci Technol, 29(5): 106-108. [韩志萍，2006. 铬铜镍在芦竹中的富集与分布[J]. 环境科学与技术，29(5)：106-108.]

HAN ZP, HU XB, HU ZH, 2005. Phytoremediation of mercury and cadmium polluted wetland by *Arundo donax*[J]. J Appl Ecol, 16(5): 945-950. [韩志萍，胡晓斌，胡正海，2005. 芦竹修复镉汞污染湿地的研究[J]. 应用生态学报，16(5)：945-950.]

HAN ZP, HU ZH, 2005. Tolerance of *Arundo donax* to heavy metals[J]. J Appl Ecol, 16(1): 161-165. [韩志萍，胡正海，2005. 芦竹对不同重金属耐性的研究[J]. 应用生态学报，16(1)：161-165.]

HAN ZP, LU CY, WANG CY, 2008. Effects of cadmium stress on the antioxidant enzymes activities in *Arundo donax* L.[J]. J Nucl Agric Sci, 22(6):846-850.[韩志萍，吕春燕，王趁义，等，2008. 镉胁迫对芦竹抗氧化酶活性的影响[J]. 核农学报，22(6)：846-850.]

HAN ZP, WANG CY, 2007. Accumulation and distribution of cadmium, lead, mercury, and copper in *Arundo donax* of different ecotype[J]. Ecol Environ, 16(4): 1092-1097. [韩志萍，王趁义，2007. 不同生态型芦竹对 Cd、Hg、Pb、Cu 的富集与分布[J]. 生态环境学报，16(4)：1092-1097.]

HAN ZP, YANG ZH, WU X, et al., 2010. Effects of lead stress on antioxidant enzymes activities in *Arundo donax* L.[J]. J Nucl Agric Sci, 24(4): 846-850. [韩志萍，杨志红，吴湘，等，2010. 铅胁迫对芦竹抗氧化酶活性的影响[J]. 核农学报，24(4)：846-850.]

HU XY, QI SY, LI RL, 2018. Effects of cadmium stress on growth, chlorophyll content and photosynthetic characteristics of *Xanthium italicum*[J]. J Shenyang Univ (Nat Sci Ed), 30(1): 18-24. [胡小英，齐淑艳，李瑞莉，2018. 镉胁迫对意大利苍耳(*Xanthium italicum*)生长、叶绿素及光合特性的影响[J]. 沈阳大学学报(自然科学版)，30(1)：18-24.]

Kalaji HM, Lobody T, 2007. Photosystem II of barley seedlings under cadmium and lead stress[J]. Plant Soil Environ, 53(12): 511-516.

LI ML, LI H, WANG KR, et al., 2016. Effect of arbuscular mycorrhizae on the growth, photosynthetic characteristics and cadmium uptake of peanut plant under cadmium stress[J]. Environ Chem, 35(11): 2344-2352. [李明亮，李欢，王凯荣，等，2016. Cd 胁迫下丛枝菌根对花生生长、光合生理及 Cd 吸收的影响[J]. 环境化学，35(11)：2344-2352.]

LI Z, TAN XF, LU K, et al., 2017. Influence of drought stress on the growth，leaf gas exchange, and chlorophyll fluorescence in two varieties of tung tree seedlings[J]. J Ecol, 37(5): 1515-1524. [李泽，谭晓风，卢锟，等，2017. 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报，37(5)：1515-1524.]

LI HF, ZHU JR, FU J, 2007. Toxicity of thallium and its impacts of human health[J]. Chin J Public Health Manag, 23(1): 77-79. [李汉帆，朱建如，付洁，2007. 铊的毒性及对人体的危害[J]. 中国公共卫生管理，23(1)：77-79.]

LIU JY, CHANG XY, TU XL, 2007. Thallium pollution and its countermeasures[J]. Soils, 39(4): 528-535. [刘敬勇，常向阳，涂湘林，2007. 重金属铊污染及防治对策研究进展[J]. 土壤，39(4)：528-535.]

LOU AY, 2014. Study on the physiecological characteristics of moso bamboo(*Phyllostachys pubescence*) leaf and its response to soil water condition in LiJiang river upstream area[D]. Guilin: Guangxi Normal University. [罗艾滢，2014. 漓江上游毛竹叶片生理生态学特征及其对土壤水分响应研究[D]. 桂林：广西师范大学.]

LU Y, LI XR, HEMZ, et al., 2011. Photosynthesis and physiological characteristics in *Halogeton glomeratus* with heavy metal treatments[J]. Acta Bot Boreal -Occident Sin, 31(2): 370-376. [鲁艳，李新荣，何明珠，等，2011. 重金属对盐生草光合生理生长特性的影响[J]. 西北植物学报，31(2)：370-376.]

MA JB, 2014. Research on phytoremediation technology about soil contamination of titanium mine in panzhihua[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. [马继彪，2014. 攀西矿区植物对钛的富集特征和污染控制技术研究[D]. 成都：西南交通大学.]

MIAO XF, 2010. Giant reed(*Arundo donax* L.) remediation with amendments for metal-contaminated soils from the typical mining and areas[D]. Changsha: Central South University. [苗旭锋，2010. 典型矿冶区重金属污染土壤芦竹-化学联合修复研究[D]. 长沙：中南大学.]

Nijs I, Ferris R, Blum H, et al., 1997. Stomatal regulation in a changing climate: a field study using free air temperature increase (FATI) and free air CO_2 enrichment (FACE)[J]. Plant Cell Environ, 20(8): 1041-1050.

PU G, ZHANG D, ZENG D, et al., 2018. Physiological response of *Arundo donax* L. to thallium accumulation in a simulated wetland[J]. Mar Freshwater Res, 69 (5): 714-720.

QING TC, RUAN J, WANG LJ, 2000. Effect of Cd on the plant photosynthesis[J]. Environ Sci Technol, (S1): 33-35+44. [秦天才，阮捷，王腊娇，2000. 镉对植物光合作用的影响[J]. 环境科学与技术，(S1)：33-35+44.]

SUN GW, ZHU ZJ, FANG XZ, et al., 2005. Effect of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of pakchoi[J]. J Plant Nutr Fert Sci, 11(5): 700-703. [孙光闻，朱祝军，方学智，等，2005. 镉对小白菜光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物营养与肥料学报，11(5)：700-703.]

SUN JY, LIU YQ, LI BL, et al., 2018. Research progress on mechanism of plant tolerance to

cadmium and remediation of cadmium contaminated soil[J]. Jiangsu Agric Sci, 46(7): 12-19. [孙婕妤，刘艳秋，李佰林，等，2018. 植物对镉的耐性机制以及对镉污染土壤修复的研究进展[J]. 江苏农业科学，46(7)：12-19.]

TANG WJ, LI MS, 2008. Heavy Metal Concentrations of Dominant Plants and Bioaccumulation in Three Manganese Mine Wastelands, Guangxi[J]. J Agric-Environ Sci, 27(5): 1757-1763. [唐文杰，李明顺，2008. 广西锰矿区废弃地优势植物重金属含量及富集特征[J]. 农业环境科学学报，27(5)：1757-1763.]

WANG FY, 2011. Remediation of metal-contaminated soils with gaint reed(*Arundo donax* L.) and its comprehensive utilization of harvested plant[D]. Changsha: Central South University.[王凤永，2011. 重金属污染土壤的芦竹修复及其产后综合利用[D]. 长沙：中南大学.]

XU DQ, 2002. Photosynthesis efficiency[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press: 163-167. [许大全，2002. 光合作用效率[M]. 上海：上海科学技术出版社，163-167.]

YANG L, GUO HQ, 2018. Advances in plant remediation of heavy metal pollution in soil[J]. Guangdong Chem, 45(6): 118-119. [杨列，郭后庆，2018. 土壤重金属污染的植物修复研究进展[J]. 广东化工，45(6)：118-119.]

YAO G, GAO HY, WANG WW, et al., 2009. The effects of Pb-stress on functions of photosystems and photosynthetic rate in maize seedling leaves[J]. J Ecol, 29(3): 1162-1169. [姚广，高辉远，王未未，等，2009. 铅胁迫对玉米幼苗叶片光系统功能及光合作用的影响[J]. 生态学报，29(3)：1162-1169.]

ZHANG JT, MENG BN, 2018. Effects of Pb^{2+} and Cd^{2+} combined stress on photosynthesis of *Morus alba*[J]. J BeiJing For Univ, 40(4): 16-23. [张嘉桐，孟丙南，2018. Pb^{2+}、Cd^{2+}复合胁迫对桑树光合作用的影响[J]. 北京林业大学学报，40(4)：16-23.]

ZHAO JS, BAI M, CHENG FM, et al., 2008. Physio-ecological characteristics of *Phragmites australis* and *Arundo donax* under two types of constructed wetlands[J]. Wetlands Sci, 6(3): 398-404. [赵建松，白梅，程凤鸣，等，2008. 两种人工湿地条件下芦苇与芦竹生理生态特性研究[J]. 湿地科学，6(3)：398-404.]

ZHU ZG, ZHOU SB, 2014. Effects of physiolgical and biochemical characteristics, accumulation of *Arundo donax* and soil enzyme activities under combined stress of Cu and Zn[J]. J Soil Water Conserv, 28(1): 276-280. [朱志国，周守标，2014. 铜锌复合胁迫对芦竹生理生化特性、重金属富集和土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报，28(1)：276-280.]